

# TLS 변위계측모델을 이용한 장스팬 철골 박스형 거더의 변위 계측 Displacement Measurement of an Existing Long Span Steel Box-Girder using TLS(Terrestrial Laser Scanning) Displacement measurement Model

이홍민\* · 박효선\*\* · 이임평\*\*\* · 권윤한\*\*\*\*

Lee, Hong Min · Park, Hyo Seon · Lee, Impyeong · Kwon, Yun Han

## Abstract

It was previously introduced a new displacement measuring technique using terrestrial laser scanning (TLS) that remotely samples the surface of an object using laser pulses and generates the three-dimensional (3D) coordinates of numerous points on the surface. In this paper, for an assessment of the capabilities of the measuring technique about existing structures, the field tests for vertical displacement measurement of an existing long span steel box-girder are experimentally carried out. The performance of the technique is evaluated by comparing the displacements obtained from TLS system and displacements directly measured from linear variable displacement transducer (LVDT).

**key words** : Structural health monitoring, displacement measurement, vision-based monitoring

## 1. 서론

시공된 구조물의 구조 반응들은 구조해석 시 모델링에 이용된 가정, 설계 도면과 시공의 차이, 작용 하중의 변화 등의 다양한 이유에 의하여 설계 시 평가된 수준과는 현실적으로 다르다. 또한 시공 후 시간이 경과 하면서 피로가 누적되거나 예상치 못한 하중 및 기타 여러 가지 원인들에 의하여 구조 부재 또는 접합부의 역학적 성능이 변화하게 된다. 그러므로 시공된 구조물의 안전성과 사용성을 합리적으로 확보하고 유지관리 하기 위해서는 구조 반응들을 주기적으로 평가할 필요가 있다. 이러한 이유로 최근 건축 및 토목 등의 분야에서 구조물의 안전성과 사용성을 객관적으로 평가하기 위한 모니터링 기법들이 활발하게 연구되고 있으며 부분적으로 개발되어 실 구조물에 적용되고 있다.

본 연구와 관련해서 구조물 또는 부재의 변위와 변형 형상을 계측할 수 있는 기법에 관한 연구로는 사진 측량학의 기술을 응용한 영상기반 구조 거동 모니터링 기법이 있다(Olaszek, 1999; Fraser, 2000; Wahbeh, 2003). 영상기반 구조 거동 모니터링 기법의 경우 약 1 mm 내외의 정밀도로 구조물의 거동 예측이 가능하고 정적계측 뿐만 아니라 동적 계측 또한 가능하다. 그러나 사진 측량을 위하여 다수의 사진기가 필요할 수 있으며 정밀도 향상을 위하여 구조물 이외의 고정된 지점과 사진기와와의 정밀한 거리 측량이 필요하고 또한 필요에 따라서는 구조물에 고정된 반사 표적을 설치해야하는 단점을 가지고 있다.

최근 GIS(Geographic Information Systems) 분야에서 사용되는 레이저 스캐닝 시스템은 영상기반 기법에 비하여 상대적으로 환경의 영향을 크게 받지 않으며 특정 위치가 아닌 건물 또는 대상물의 전체의 형상에 대한 3차원 위치 정보를 획득할 수 있다는 장점이 있다(Ackemann, 1999).

본 논문에서는 레이저 스캐닝 시스템을 이용하여 구조물의 3차원 위치 정보를 획득하고 이에 TLS 변위계측모델(Park, 2007)을 적용하여 실 구조물인 장스팬 철골 박스형 거더의 수직 처짐을 추정하였다. TLS 변위계측모델로 추정한 수직 처짐과 LVDT로 계측한 수직 처짐의 비교를 통하여 그 성능을 확인하였다.

\*\*\*\* 정회원·연세대학교 대학원 건축공학과·박사과정·E-mail: idislee@yonsei.ac.kr

\*\* 정회원·연세대학교 건축도시공학부·부교수

\*\*\* 정회원·서울시립대학교 공간정보공학과·조교수

\*\*\*\* 정회원·연세대학교 대학원 건축공학과·박사후과정

## 2. TLS 변위계측모델

레이저 스캐닝 시스템을 이용하여 획득한 대상 구조물의 3차원 좌표 정보는 약 10 mm 내외의 정밀도를 가진다(Trimble, 2006). 또한 그 좌표 정보는 레이저 스캐너를 중심으로 획득한 구조물의 상대좌표이기 때문에 직접적인 구조물의 거동 평가에 있어서 어려움이 있다. 레이저 스캐너로 획득한 3차원 좌표 정보에서 약 10 mm의 내외의 오차를 줄이고 직접적으로 구조물의 거동 평가를 할 수 있는 구조정보를 얻기 위해서는 TLS 변위계측모델을 적용할 수 있다(Park, 2007). TLS 변위계측모델은 다음과 같이 4 단계로 구성된다. 본 논문에서는 TLS 변위계측모델을 그림 1과 같은 장스팬 박스형 거더의 변위계측에 적용하였다. i) TLS를 이용한 형상 정보 획득(그림 1.(a),(b)), ii) 최소제곱법을 이용한 기준벡터 생성(그림 1.(c)), iii) 기준벡터를 이용한 TLS 좌표계로부터 구조물의 좌표계의 좌표변환(그림 1.(d)), iv) 구조물 좌표계에서의 변위계산(그림 1.(e)).

## 3. TLS 변위계측모델의 적용 및 분석

TLS 변위계측모델의 실 구조물에 대한 적용성을 알아보기 위하여 실제 사용되고 있는 장스팬 철골 박스형 거더의 수직 처짐을 TLS 변위계측모델로 계측하고 이를 LVDT로 계측한 수직 처짐과 비교하였다. 박스형 거더는 길이 27.7 m의 스패너로 춤 1450 mm, 폭 650 mm, 웹 두께 8 mm, 그리고 플랜지 두께 12 mm 인 빌트업 단면이고, 재질은 SS400이다. 그림 2.(a)와 같이 무게를 알고 있는 콘크리트 매스를 이용하여 거더의 중앙에 두 정적하중(Step 1 = 19.6 kN, Step 2 = 39.2 kN)을 재하 하였다. 이 두 정적하중에 의하여 발생하는 거더 중앙부의 수직 처짐을 계측하기 위하여 그림 2.(b)와 같이 LVDT를 설치하였다. 그리고 그림 2.(c)와 같이 지상 레이저 스캐너를 이용하여 약 50 m 떨어져 있는 거리에서 거더의 3차원 형상정보를 획득하였으며 2장에서 소개한 TLS 변위계측모델을 적용하여 재하 전, Step 1, 그리고 Step 2에서의 각각의 처짐 및 처짐 형상을 추정하였다.

그림 3은 하중 재하에 따른 대상 구조물의 3차원 좌표로부터 TLS 변위계측모델을 적용한 후의 거더의 하부 플랜지의 3차원 좌표 정보 및 추정한 처짐 곡선을 나타내고 있다. 3 종류의 좌표데이터 중 상부의 좌표데이터는 재하하기 전의 거더의 하부 플랜지의 좌표 정보를 나타내고 있으며, 중간 좌표데이터는 Step 1, 그리고 하부의 좌표데이터는 Step 2의 하중 재하에 따른 하부 플랜지의 좌표 정보를 나타내고 있다.

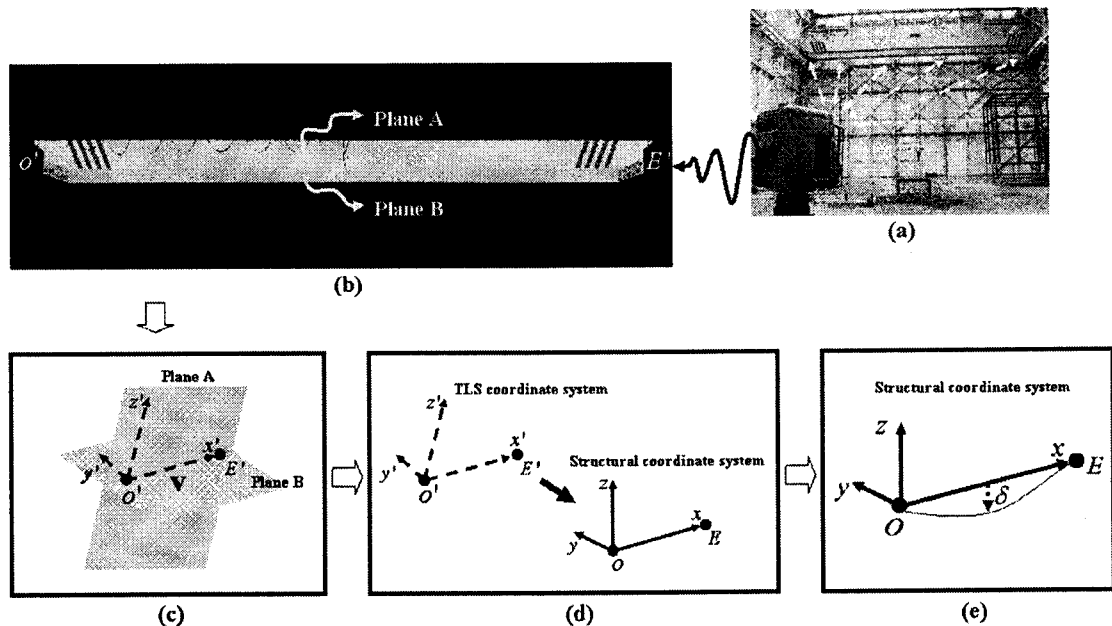


그림 1. TLS 변위계측모델을 이용한 대상 구조물의 변위계측

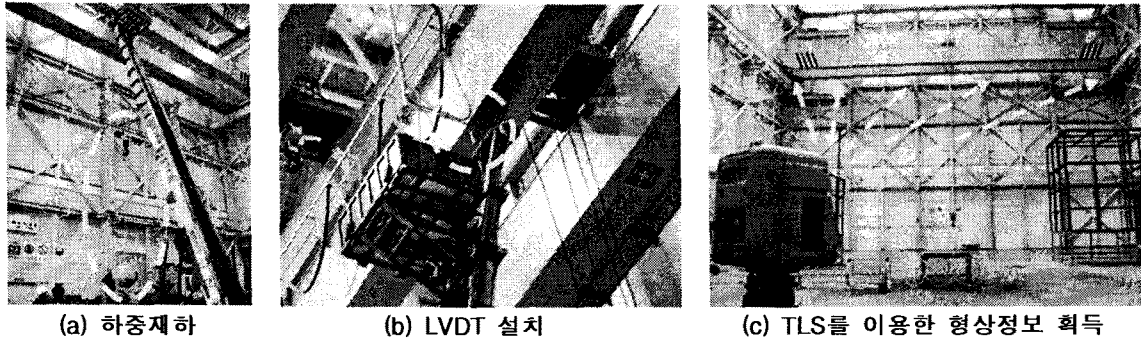


그림 2. 실험사진

그림 3에서 TLS 변위계측모델을 이용하여 구조좌표계로 변환한 하부 플랜지의 좌표들은 2장에서 설명한 바와 같이 레이저 스캐너의 오차를 포함하고 있고, 비교를 하기 위한 특정한 점을 결정하는데 어려움이 있다. 이러한 오차를 최소화 하고 거더 길이 방향의 각 위치에서의 대표적인 수직 처짐을 결정하기 위해서 적절한 보간법을 사용할 필요가 있다. 본 연구에서는 TLS 변위계측모델에 최소제곱법을 이용한 보간법을 사용하여 각 위치에서의 수직 처짐을 결정하였다. 최소제곱법을 적용하여 정확한 보간을 하기 위해서는 처짐 형상에 가장 적합한 함수를 유추하여야 한다. 그러나 본 실험 계측 대상인 박스형 거더는 플랜지 및 웨브가 용접으로 조립되어진 빌트업 부재로 그림 3에서 확인되는 것과 같이 거더 길이방향에 따라 면이 고르지 못함을 알 수 있었고 적합한 함수를 유추하기에는 어려움이 있었다. 본 연구에서는 거더 길이방향에 대한 보의 처짐을 오일러 보 이론에 근거하여 함수를 유추하여 다항식을 결정하였다.

TLS 변위계측모델에 의하여 계측된 거더 중앙부의 하중 재하 전 초기 수직 처짐의 값은 3.66 mm 로 추정되었으며, 하중 재하 후의 수직 처짐의 값은 각각 5.60 mm(Step 1), 6.89 mm(Step 2)로 추정되었다. 하중 재하 전 초기 수직 처짐과 각각 하중 재하 후의 수직 처짐의 차이는 각각 1.94 mm, 3.23 mm로 LVDT로 계측된 1.69 mm, 3.37 mm와 비교하여 각각 0.25 mm, 0.14 mm의 오차로 정밀도가 평가되었다(표 1). 또한 LVDT로 계측할 수 없었던 거더의 초기 자중에 의한 처짐을 추정 할 수 있었고 변형 형상 또한 추정할 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 본 논문에서 현장 계측된 빌트업 부재의 경우 시공상에서 발생할 수 있는 오차로 인하여 거더 길이방향에 따라 면이 고르지 못함을 알 수 있었고 정확한 구조물의 변형 정보를 유추하기에 어려움이 있음을 알 수 있었다.

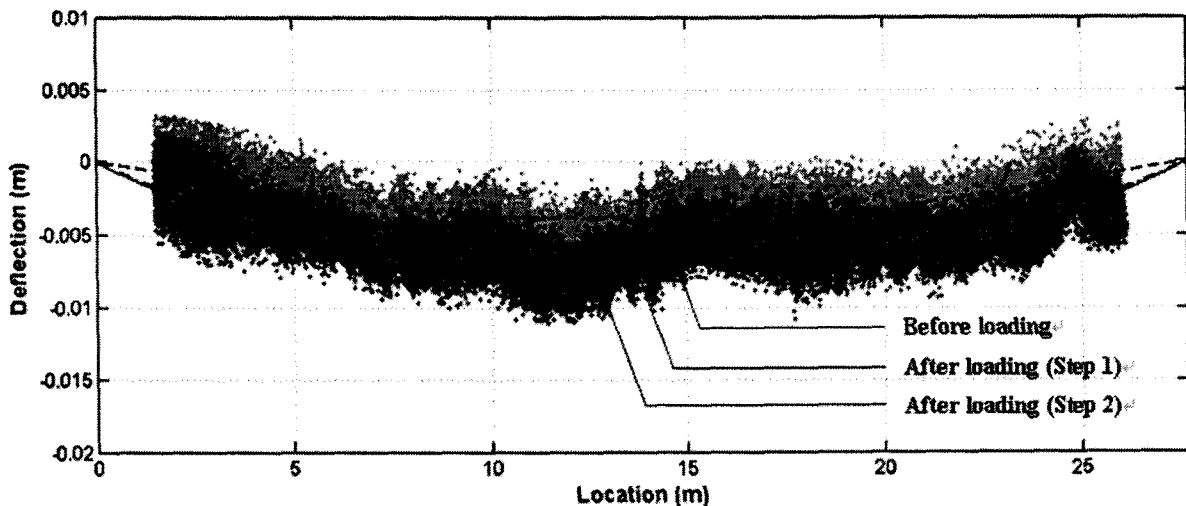


그림 3. TLS 변위계측모델을 적용한 대상 구조물 하부 플랜지의 좌표 정보 및 추정한 처짐 곡선 (하중 재하 전, Step 1, Step 2)

표 1. 박스형 거더의 중앙에서 계측된 수직 처짐 비교

Loading step	Measuring techniques	Vertical Deflections (mm)
Step 1 P = 19.6 kN	LVDT	1.69
	TLS system	1.94
Step 2 P = 39.2 kN	LVDT	3.37
	TLS system	3.23

#### 4. 결 론

본 논문에서는 구조물의 헬스 모니터링 분야의 새로운 기술로 TLS를 이용한 변위 및 변형 형상 계측 기술이 소개되었다. 그리고 실 구조물의 적용성에 대한 그 성능을 평가하기 위해서 장스팬 철골 박스형 거더의 수직 처짐 계측을 위한 현장 실험을 수행하게 되었다. TLS 변위계측모델의 성능은 LVDT로부터 직접 계측한 수직 처짐과 TLS 변위계측모델로부터 추정된 수직 처짐과의 비교를 통하여 평가되었다. TLS 변위계측모델로 추정된 수직 처짐의 결과는 LVDT로 직접 계측한 수직 처짐과 비교해 볼 때 0.5 mm 이내의 오차에서 정밀하게 계측됨을 알 수 있었고 특정한 위치의 수직 처짐뿐만 아니라 변형 형상도 유추할 수 있음을 예상할 수 있었다. 그러나 실 구조물의 경우 본 논문의 실험 대상 구조물과 같이 빌트업 부재가 많으며 또한 시공상에서 발생할 수 있는 오차 등 예상하지 못한 구조물의 반응이 항상 내재하여 있기 때문에 정확한 구조물의 변형 정보를 유추하기 위해서는 레이저 스캐너로 획득한 3차원 좌표 정보에 대해서 보다 합리적인 평가를 할 수 있는 수치해석 방법이 필요할 것으로 예상되며 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2005년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2005-01504).

#### 참고문헌

1. Ackemann, F. (1999), Airborne laser scanning-present status and future expectations, *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54, 64-67.
2. Fraser, C. S. & Riedel, B. (2000), Monitoring the thermal deformation of steel beams via vision metrology, *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 55, 268-76.
3. Olaszek, P. (1999), Investigation of the dynamic characteristic of bridge structures using a computer vision method, *Measurement*, 25, 227-36.
4. Park, H. S., Lee, H. M., Adeli, H., Lee, I. (2007), A new approach for health monitoring of structures: terrestrial laser scanning, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 22, 19-30.
5. Trimble. (2006), Trimble GX 3D Scanner Brochure. Retrieved March, 2006 from: <http://www.trimble.com/3dlaserscanners.shtml>.
6. Wahbeh, A. M., Caffrey, J. P. & Masri, S. F. (2003), A vision-based approach for the direct measurement of displacements in vibration systems, *Smart Materials and Structures*, 12, 785-94.